



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
11 DE 3607913 C1

51 Int. Cl. 4:
G01 M 3/24
G 01 N 29/04

21 Aktenzeichen: P 36 07 913.8-52
22 Anmeldetag: 10. 3. 86
43 Offenlegungstag: —
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 13. 8. 87



DE 3607913 C1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eV, 8000 München, DE

72 Erfinder:

Frommhold, Werner, Dipl.-Ing., 7000 Stuttgart, DE;
Fuchs, Helmut V., Dr.-Ing., 7031 Weil, DE;
Schmidt-Schykowski, Klaus, Dipl.-Ing. (FH), 7000
Stuttgart, DE

56 Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene
Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-OS 30 45 660
Fuchs, H.V.;
Riehle, R.;
Schmidt-Schykowski, K. Systematische
Rohrnetz-Überprüfung mit Hilfe verbesserter
akustischer Methoden in: Fortschritte der
Akustik-DAGA '85, S. 739-742, Bad Honnef:
DPG-GmbH 1985;
Bendat, J.S.;
Piersol, A.G. Engineering Applications of Correlation
and Spectral Analysis John Wiley & Sons, New
York 1980;

54 Verfahren zum Orten von Leckstellen in Rohrleitungen

Bei dem erfindungsgemäßen Leckortungsverfahren mit Kreuzkorrelationsanalyse wird zur Messung der Laufzeitdifferenz ein 2-Kanal-FFT-Analysator benutzt. Das Kreuzleistungsspektrum wird zunächst einer Egalisierung unterworfen, erforderlichenfalls mit einer geeigneten Frequenzbewertung gewichtet und anschließend in den Zeitbereich zurücktransformiert. Dadurch wird an Stelle der bekannten Kreuzkorrelationsfunktion eine andere Zeitfunktion mit optimalem Auflösungsvermögen erhalten, was die Ermittlung von Leckstellen mit höherer Genauigkeit und in einem größeren Meßbereich ermöglicht. Die nachträgliche Egalisierung des Kreuzleistungsspektrums ist in viel feinerer Weise möglich, als sie mit konventionellen Filtern 3 nach Figur 1 erreichbar wäre.

Das Verfahren läßt sich ohne zusätzlichen Geräteaufwand in üblichen FFT-Analysatoren implementieren. Da es automatisch ablaufen kann, erfordert die Zwischenschaltung der Egalisierung keinen zusätzlichen Zeitaufwand im praktischen Einsatz.

DE 3607913 C1

Patentansprüche

1. Verfahren zum Orten von Leckstellen in Rohrleitungen, insbesondere in Wasserversorgungsnetzen, durch Messung der Laufzeitdifferenz der von einem Leck ausgehenden Schallwellen, wobei von akustischen Sensoren gelieferte elektrische Signale durch Kreuzkorrelation mittels eines Zweikanal-FFT-Analysators ausgewertet werden, dadurch gekennzeichnet, daß das im Analysator gemessene komplexe Kreuzleistungsspektrum zunächst in seinem Betrag durch Abschwächung von Frequenzbereichen mit großer Amplitude und Anheben von Frequenzbereichen mit geringer Amplitude so geformt wird, daß es in einem möglichst breiten Frequenzband möglichst gleiche Amplituden aufweist und erst nach dieser Egalisierung die Rücktransformation in den Zeitbereich vorgenommen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Egalisierung durch Dividieren des Kreuzleistungsspektrums mit der Wurzel aus dem Produkt der Leistungsspektren der zwei Eingangssignale erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß im egalisierten Kreuzleistungsspektrum eine zusätzliche Frequenzbewertung, vorzugsweise in Form einer vom Benutzer variierbaren Filter-Charakteristik, vorgesehen wird, um eventuelle Störanteile, welche bedingt durch die Egalisierung eine größere Amplitude als im ursprünglichen Kreuzleistungsspektrum aufweisen können, vor der Rücktransformation in den Zeitbereich zu eliminieren.

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Orten von Leckstellen in Rohrleitungen, insbesondere in Wasserversorgungsnetzen, durch Messung der Laufzeitdifferenz der von einem Leck ausgehenden Schallwellen, wobei von akustischen Sensoren gelieferte, elektrische Signale durch Kreuzkorrelationsanalyse ausgewertet werden. Eine Meßanordnung für ein solches Verfahren zeigt die Fig. 1. An den Orten *a* und *b* sind im Abstand *l* an der Rohrleitung die akustischen Sensoren 1 angebracht, deren elektrische Signale mit Verstärkern 2 und Filtern 3 aufbereitet werden. Mit den Filtern 3 werden störende Signalanteile, z. B. das tieffrequente Pumpengeräusch, vom Analysator 4 ferngehalten. Zur Optimierung der Filtereinstellung liefert nach [1] die Kohärenzfunktion γ^2 wertvolle Zusatzinformation. Nach [2], Seite 54 ist

$$\gamma^2 = |GBA|^2 / (GAA \cdot GBB),$$

wobei mit *GBA* das Kreuzleistungsspektrum, mit *GAA* und *GBB* das Leistungsspektrum des Sensorsignals in Kanal *a* und *b* bezeichnet wird. Danach werden die Signale dem Analysator 4 zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz zugeführt.

Unterhalb einer durch den Durchmesser des Rohres gegebenen Grenzfrequenz sind im Fluid nur ebene Schallwellen ausbreitungsfähig. Unter dieser Voraussetzung ist die Laufzeit, die das vom Ausströmvorgang im Leck *L* hervorgerufene Geräusch benötigt, um zu den Sensoren *a* oder *b* zu gelangen, der Entfernung direkt proportional. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit — sie wird in der Regel in einem Vorversuch bestimmt —

kann dann aus der gemessenen Laufzeitdifferenz τ_m der Signale *a(t)* und *b(t)* der Ort der Leckstelle berechnet werden.

Als Meßgerät 4 für die Laufzeitdifferenz wurden zunächst Korrelatoren verwendet, die im Zeitbereich arbeiten und die Kreuzkorrelationsfunktion

$$RBA(\tau) = \overline{a(t) \cdot b(t+\tau)}$$

- 10 liefern. Beschrieben ist eine solche Meßanordnung in Spalte 6 Zeilen 14 bis 23 und 37 bis 49 der DE-PS 30 45 660.

Neuerdings sind aber auch FFT-Analysatoren gemäß Fig. 2 im Einsatz, bei denen zunächst die Zeit-Signale *a(t)* und *b(t)* mit der Fourier-Transformation in komplexe Spektren *A(ω)* und *B(ω)* überführt werden:

$$A(\omega) = F\{a(t)\}, B(\omega) = F\{b(t)\}.$$

- 20 Anschließend wird das Kreuzleistungsspektrum

$$GBA(\omega) = \overline{A(\omega)^* \cdot B(\omega)}$$

(*A(ω)** ist die konjugiert komplexe Größe zu *A(ω)*) berechnet und danach die Kreuzkorrelationsfunktion durch die Invers-Fourier-Transformation gewonnen:

$$RBA(\tau) = F^{-1}\{GBA(\omega)\}.$$

- 30 Bei der Laufzeitdifferenz τ_m erscheint in *RBA* ein Maximum. Je schärfer dieses Maximum ausgeprägt ist, desto sicherer und genauer kann τ_m bestimmt werden. Ein rasches Abklingen von *RBA* um τ_m herum ist besonders auch dann wichtig, wenn mehrere Schallquellen mit verschiedenen Laufzeitdifferenzen vorhanden sind.

Wie rasch *RBA* um τ_m herum abklingt, wird durch die Hüllkurve von *GBA* bestimmt: schreibt man das komplexe Kreuzleistungsspektrum nach Betrag und Phase, so folgt für *RBA*:

$$RBA(\tau) = F^{-1}\{|GBA(\omega)|\} * F^{-1}\{\exp(j\Phi)\}.$$

- Der Stern bezeichnet die Faltungsoperation [2], Seite 16. Die gesuchte Information über die Laufzeitdifferenz τ_m ist ausschließlich in der Phase Φ enthalten. Es ist daher zulässig, auf den Term links vom Faltungssymbol, der lediglich die abklingende Schwingung von *RBA* um τ_m herum beschreibt, Einfluß zu nehmen. Ziel dieser Operation ist es, eine ausgeglichene und breitbandige Hüllkurve des Kreuzleistungsspektrums zu erzielen, weil die Auflösung im Zeitbereich Δt gemäß der Unschärferelation $B \cdot \Delta t = 1$ der Bandbreite *B* der zugehörigen Frequenzfunktion umgekehrt proportional ist. Die Notwendigkeit für eine derartige Verbesserung der bisherigen Meßverfahren wird in Fig. 3 mit Meßergebnissen bei der Leckortung auf einer Fernwärmeleitung (Stahlrohr, Nennweite 100 mm, Länge des Meßabschnittes 195 m) demonstriert: In den Spektren der Sensorsignale erscheinen scharfe Resonanzen (wenig gedämpfte Biegeschwingungen des Stahlrohrs), die sich in das Kreuzleistungsspektrum abbilden. Daher erscheint in *RBA* nur ein breites verschmiertes Maximum, die Bestimmung von τ_m ist mit großer Unsicherheit behaftet. Zur Vermeidung dieses Nachteils wurde bisher nur versucht, durch eine geeignete spektrale Formung in den Filtern 3 ein ebenso ausgeglichenes Spektrum der Sensorsignale vor dem Korrelationsprozeß herbeizuführen und so die Korrelationsfunktion zu verbessern

(United States Patent 44 35 974). Diese Vorgehensweise verlangt zusätzlichen Geräte- und Zeitaufwand und führt in der Anordnung nach Fig. 1 zu einem zusätzlichen Meßfehler, weil sich bei Einstellung auf zwei i. a. verschiedene Spektren $A(\omega)$ und $B(\omega)$ die Filter in ihrem Phasengang unterscheiden.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, dieses aus [1] bekannte, mit einem FFT-Analysator arbeitende Leckortungsverfahren so zu verbessern, daß ohne zusätzlichen Geräte- und Zeitaufwand eine ge-
 10 nauere Leckortung ermöglicht wird.

Die Lösung dieser Aufgabe geschieht durch die im Kennzeichen des Anspruchs 1 angegebenen Verfahrensschritte. Im folgenden wird die Erfindung anhand der Figuren erläutert. Es zeigt

Fig. 1 die aus der DE-PS 30 45 660 bekannte Meßordnung,

Fig. 2 den anstelle des Meßgerätes 4 in Fig. 1 verwendbaren FFT-Analysator,

Fig. 3 ein Meßbeispiel an einem Rohrabchnitt mit dem bisher üblichen FFT-Verfahren,
 20

Fig. 4 eine Gegenüberstellung von Meßergebnissen nach dem bisherigen und dem erfindungsgemäßen FFT-Verfahren,

Fig. 5 Ergebnisse mit dem Verfahren nach der Erfindung an dem der Fig. 3 zugrunde liegenden Rohrabchnitt.

Die angestrebte Egalisation des Kreuzleistungsspektrums GBA wird erfindungsgemäß mit der sogenannten Dissipationsfunktion DF durch Normierung auf die Leistungspektren der Eingangssignale GAA und GBB nach folgender Definitionsgleichung erreicht:

$$DF(\omega) = \frac{GBA(\omega)}{\sqrt{GAA(\omega) \cdot GBB(\omega)}} = \gamma \cdot \exp(j\Phi) \quad 35$$

γ^2 bezeichnet wieder die Kohärenzfunktion der Signale $a(t)$ und $b(t)$. Die Dissipationszeitfunktion DTF wird durch die Invers-Fourier-Transformation aus der Dissipationsfunktion gewonnen:
 40

$$DTF(\tau) = F^{-1}\{DF(\omega)\} = F^{-1}\{\gamma\} * F^{-1}\{\exp(j\Phi)\}.$$

Solange die Sensorsignale überwiegend durch das Leckgeräusch bestimmt sind, liegt der Wert der Kohärenzfunktion nahe bei 1. In diesem Bereich ist γ praktisch unabhängig vom Leistungsspektrum der Signalquelle und vom Amplitudengang des Übertragungsweges vom Leck zu den Sensoren. Daher weist die Kohärenzfunktion fast immer eine größere Bandbreite auf als das Kreuzleistungsspektrum — und demgemäß klingt die Dissipationszeitfunktion um τ_m herum schneller ab als die Kreuzkorrelationsfunktion. Fig. 4 veranschaulicht diese Verhältnisse an Hand von Meßergebnissen für ein 12 m langes wassergefülltes Stahlrohr, \varnothing 1". Geräuschquelle ist der Strömungsvorgang durch eine Lochblende. Er erzeugt ein typisches Leckgeräusch mit über der Frequenz abfallendem Spektrum. Auch die Hüllkurve des Kreuzleistungsspektrums ist von dieser Form. GBA ist nur in einem schmalen Band bei tiefen Frequenzen ausgeprägt, daher weist RBA um die Werte $-\tau_m$ und $+\tau_m$ (einlaufende und reflektierte Welle) eine relativ langsam abklingende Oszillation tiefer Frequenz auf. Demgegenüber ist die Dissipationsfunktion DF in einem sehr breiten Frequenzband gemäß der Kohärenzfunktion ausgeprägt, so daß die Dissipationszeitfunktion ein sehr scharfes Maximum bei $-\tau_m$ ergibt. Zugleich wird der Meßbereich in Richtung sehr kleiner

Laufzeitdifferenzen (Leck nahe der Mitte des Meßabschnittes) gemäß $\Delta t = 1/B$ erheblich erweitert.

Bedingt durch die endliche Mittelungszeit bei der Messung des Kreuzleistungsspektrums und durch das Auftreten instationärer akustischer Störsignale verschwindet GBA auch außerhalb des Kohärenzbereiches nicht völlig, sondern weist dort einen zumeist regellosen Verlauf mit sehr kleinen Amplituden auf. Durch die Normierung von GBA auf die Spektren der Eingangssignale kann der Fall eintreten, daß solche Bereiche in GBA stark hervorgehoben werden, und in der Dissipationsfunktion als Störanteil erscheinen. Fig. 5 illustriert diesen Vorgang für das Beispiel in Fig. 3. In diesem Fall ist es sinnvoll, durch eine zusätzliche Gewichtung von DF diese Störanteile vor der Rücktransformation in den Zeitbereich auszublenden. Fig. 5 zeigt die bewertete DF_w , wobei für den Übergang vom Durchlaßbereich zum Sperrbereich in Anlehnung an das bekannte Hanning-Fenster [2], Seite 74, \cos^2 -Flanken verwendet wurden. Im Vergleich zu GBA in Fig. 2 ist ersichtlich, daß in der DF jetzt mehrere Oszillationen etwa gleicher Amplitude vorhanden sind, die aus DF_w gewonnene Dissipationszeitfunktion DTF_w weist ein zweifelsfreies Maximum auf.

Zitierte Literatur

- [1] Fuchs, H. V.; Riehle, R.; Schmidt-Schykowski, K., Systematische Rohrnetz-Überprüfung mit Hilfe verbesserter akustischer Methoden in: Fortschritte der Akustik — DAGA '85, Seiten 739—742, Bad Honnef: DPG-GmbH 1985.
 [2] Bendat, J. S.; Piersol, A. G., Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, New York 1980.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

- Leerseite -

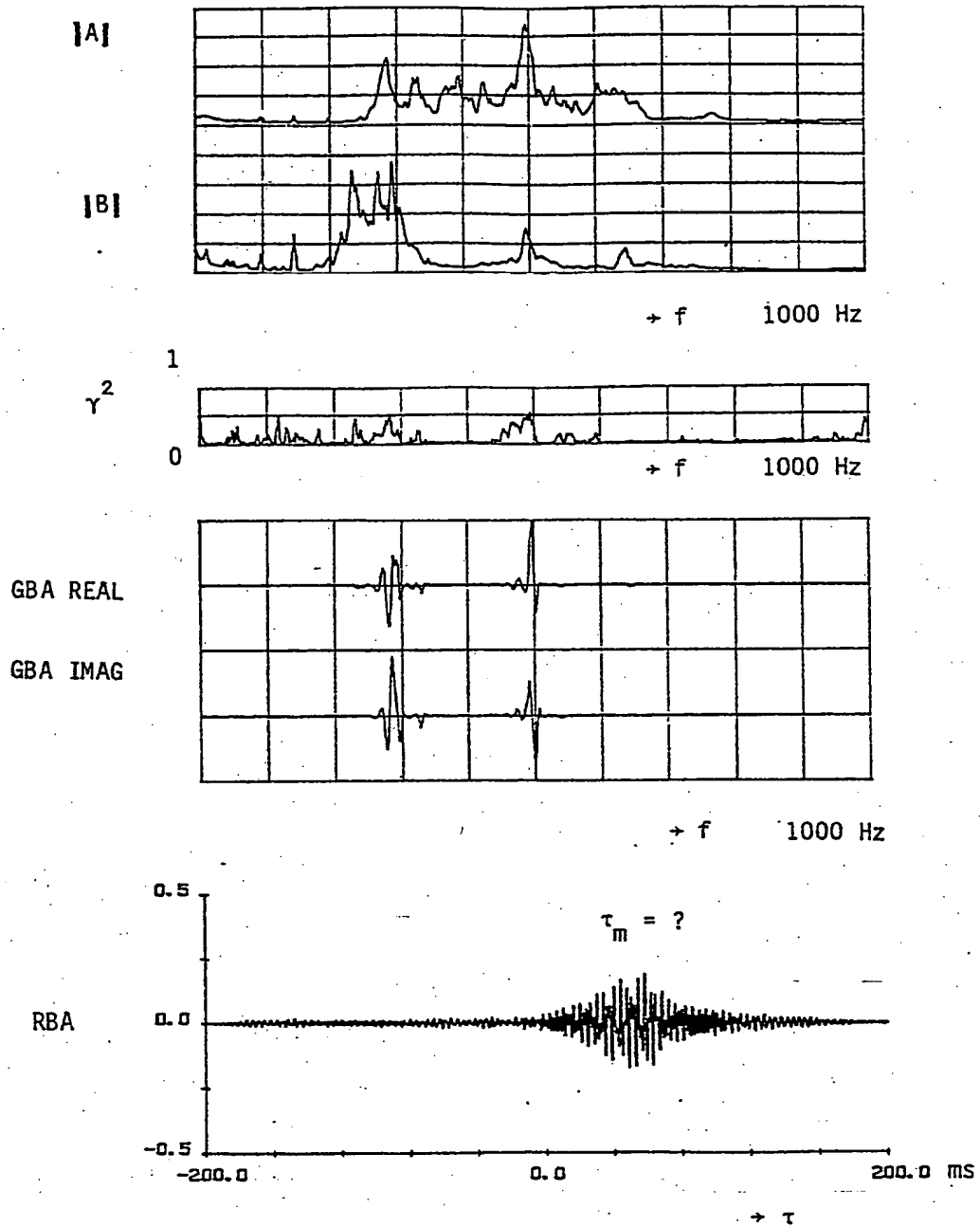


Fig. 3

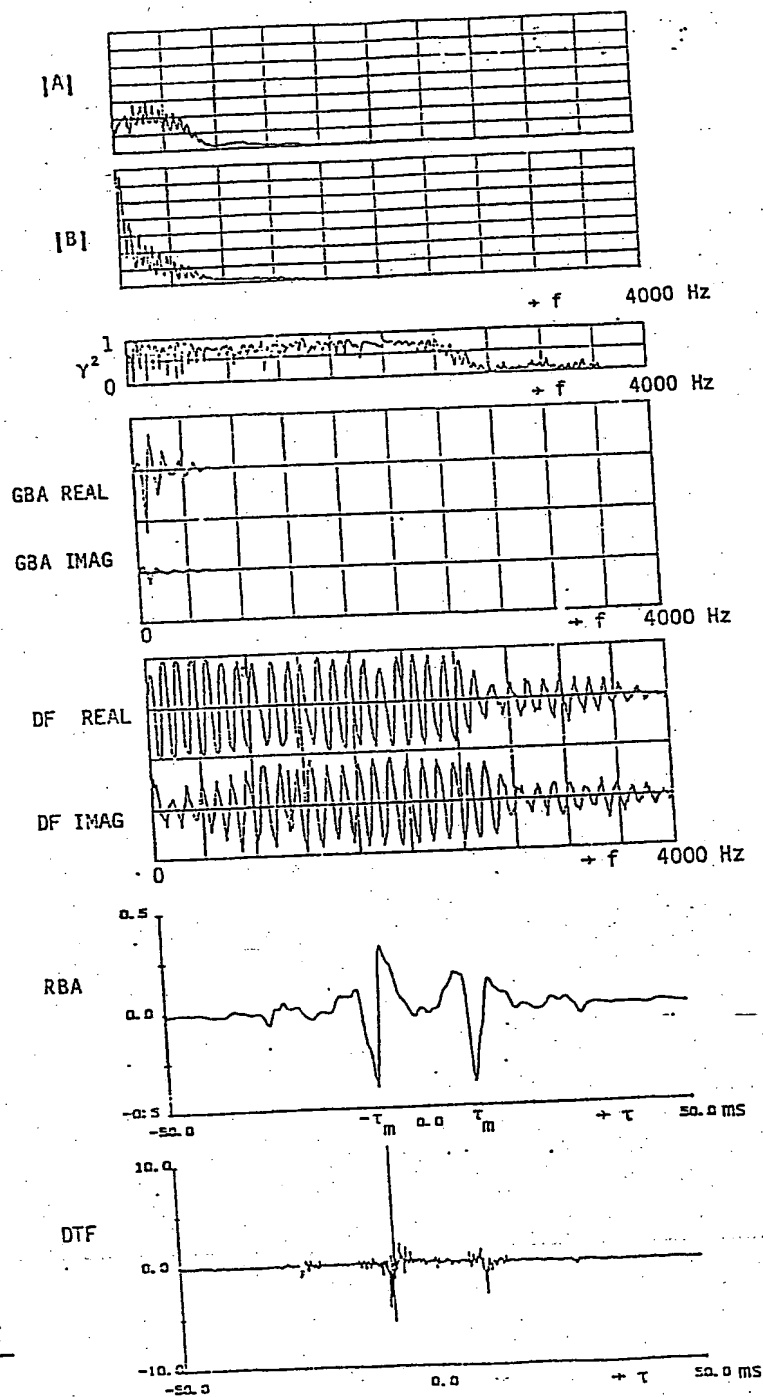


Fig. 4

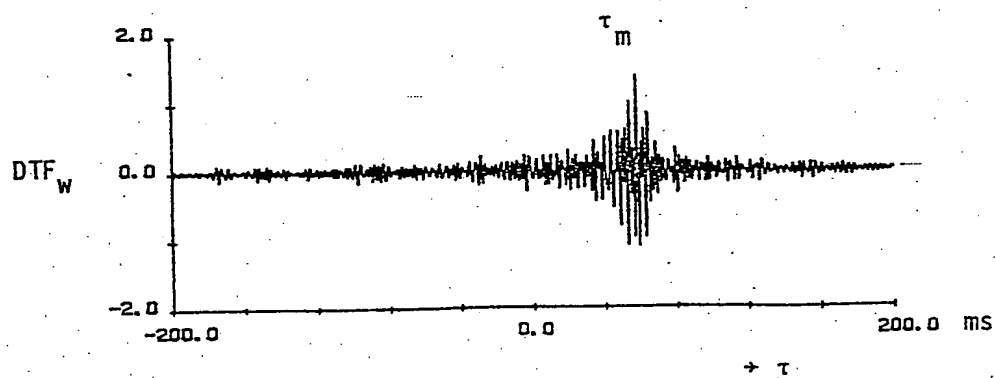
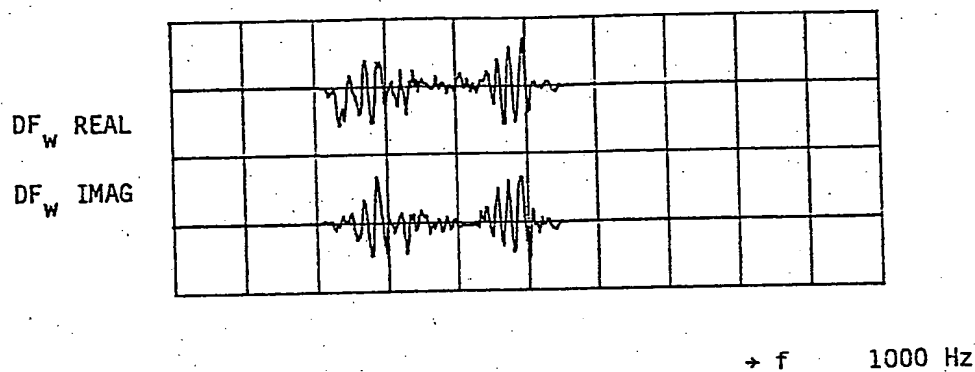
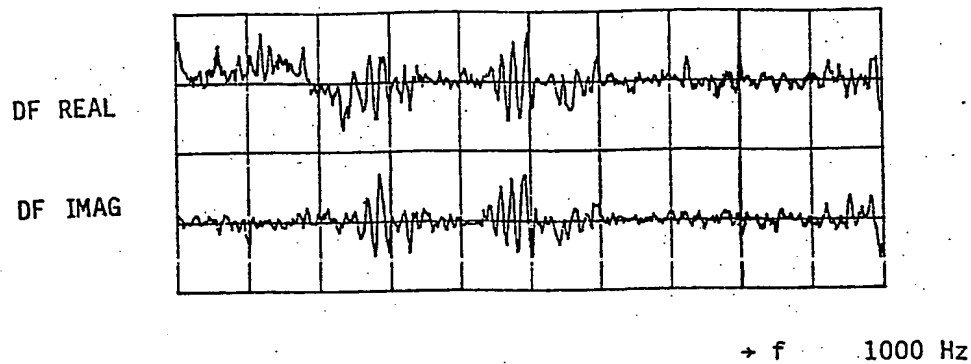


Fig. 5

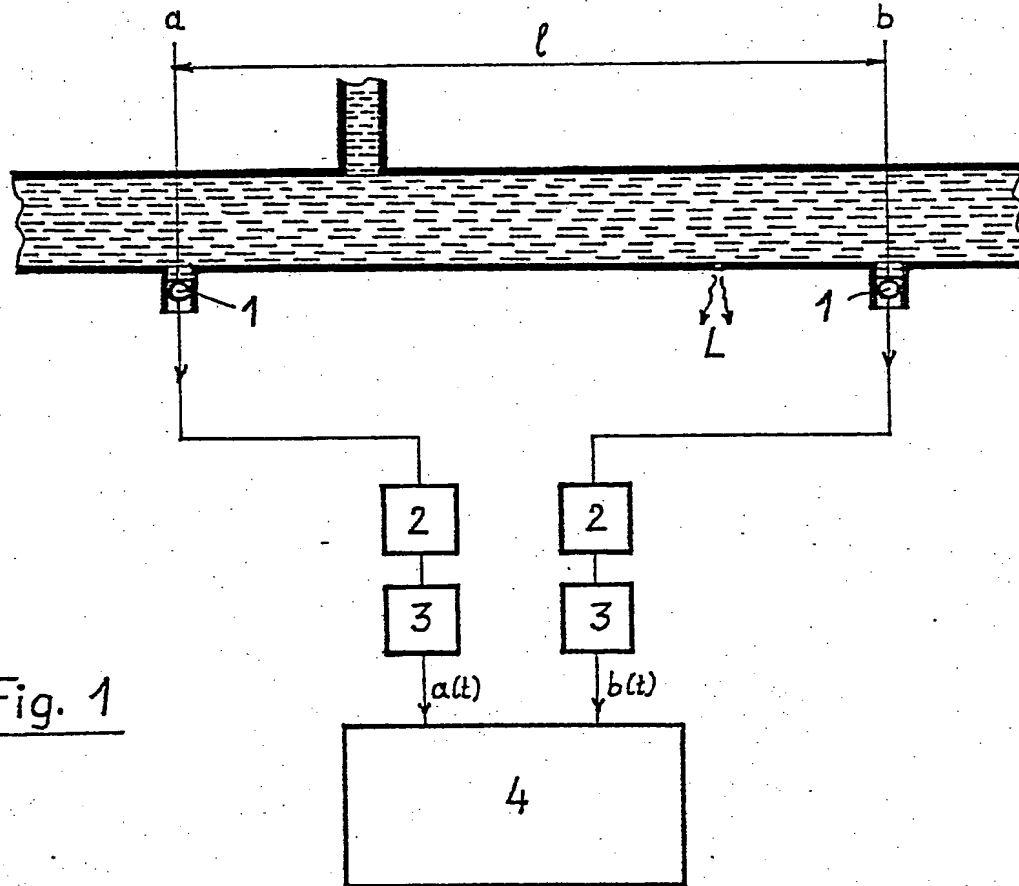


Fig. 1

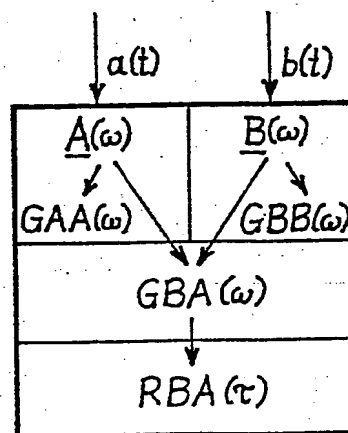


Fig. 2